

на правах рукописи



Муравьев Антон Ярославович

Колебания ледников Камчатки во второй половине XX – начале XXI вв.

Специальность 25.00.31 –
гляциология и криология Земли

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Москва, 2017

Работа выполнена в отделе гляциологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт географии Российской академии наук».

Научный руководитель	Хромова Татьяна Емельяновна <i>кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник отдела гляциологии Института географии РАН</i>
Официальные оппоненты	Ефремов Юрий Васильевич <i>доктор географических наук, профессор кафедры региональной и морской геологии геологического факультета Кубанского государственного университета</i>
	Петраков Дмитрий Александрович <i>кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова</i>
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт» Росгидромета, г. Нальчик

Защита состоится 9 февраля 2018 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.046.04 в Институте географии РАН по адресу: 119017 Москва, Старомонетный пер., 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института географии РАН:
<http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан « » декабря 2017 г.

Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 119017 Москва, Старомонетный пер., 29, учёному секретарю диссертационного совета «Д 002.046.04». Факс: (495) 959-00-33, e-mail d00204604@igras.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук

И.С. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Главной особенностью Камчатки как ледникового района является широкое распространение ледников на активных вулканах и связанная с этим специфика взаимодействия вулканизма и оледенения. Особую актуальность этой теме придаёт соседство активных вулканов с расположенными на них ледниками и наиболее густо населённых районов полуострова. В связи с этим существует проблема влияния результатов вулкано-гляциального взаимодействия на жизнь людей. В частности, крайне опасным продуктом такого взаимодействия являются лахары, отличающиеся внесезонностью и внезапностью схода. Обрушения ледяных масс на вулканах во время извержений сопровождаются сходом мощных грязекаменных потоков и наводнениями, что представляет угрозу жизни людей и хозяйственным объектам.

История изучения оледенения Камчатки существенно менее продолжительна, чем история изучения ледников Альп или Кавказа. Целенаправленное изучение оледенения района началось в конце 1950-х годов. До этого информация о ледниках получалась попутно при геологических, ботанических и иных исследованиях. Важнейшим событием в изучении оледенения Камчатки стало создание Каталога ледников СССР, в котором по единообразной методике с использованием всех доступных материалов было отражено состояние ледников района на 1950-е годы. Больше подобных каталогизаций на территорию Камчатки не проводилось.

Изученность оледенения Камчатки крайне неравномерна. Исторически наиболее изученными гляциологическими районами полуострова являются Авачинская и Ключевская группы вулканов, находящиеся в непосредственной близости от наиболее густо населённых районов Камчатки. Гораздо менее изучены ледники Кроноцкого полуострова и ряда районов Юго-Восточной Камчатки. Наименее изучены, в силу труднодоступности, ледники Срединного хребта.

В связи с этим возникает необходимость актуализации знаний о современном состоянии оледенения различных районов Камчатки и полуострова в целом. С учетом своеобразия существующих на Камчатке ледниковых форм, обусловленного влиянием вулканизма, наличия развитого моренного покрова на ледниках, широкого распространения крупных многолетних снежников и снежников-перелетков, наиболее эффективное решение этой задачи в настоящее время возможно с использованием ручных методов обработки современных данных космических съемок и проверкой результатов дешифрирования во время полевых наблюдений. Применение автоматических методов в условиях Камчатки пока не дает адекватных результатов.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является оценка современного состояния оледенения Камчатки и изменений, произошедших с ним с середины XX по начало XXI века, в условиях меняющегося климата. Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Сбор современных и исторических данных дистанционного зондирования Земли, а также гляциологических, картографических и иных материалов, полученных разными авторами в разное время, позволяющих оценить современное состояние оледенения Камчатки и его изменения за период исследований.
2. Оценка точности и, в ряде случаев, коррекция исторических данных о состоянии ледников Камчатки.
3. Оценка параметров современного оледенения ледниковых районов Камчатки на основе результатов обработки современных данных дистанционного зондирования Земли.
4. Оценка изменений оледенения различных ледниковых районов Камчатки, произошедших с середины XX по начало XXI века и в различные промежуточные периоды, в зависимости от доступности исторических данных.
5. Анализ обусловленности изменений оледенения Камчатки климатическим и вулканическим факторами.
6. Сравнение полученных результатов с результатами изменений оледенения в других горных районах умеренных широт Северного полушария.

Научная новизна работы. Впервые по единой методике с использованием результатов обработки данных дистанционного зондирования Земли с использованием данных полевых работ произведена оценка пространственного положения границ и площади современного оледенения всех ледниковых районов Камчатки и анализ реакции существующих там ледников на изменения климата.

Защищаемые положения:

1. Зафиксировано пространственное положение границ оледенения Камчатки по состоянию на 2002–2015 гг. Определена современная площадь каждого из 643 идентифицированных ледников и площадь оледенения Камчатки в целом ($769,47 \pm 30,27 \text{ км}^2$).
2. Выявлено сокращение площади оледенения Камчатки в целом на 10,6% с середины XX по начало XXI века. Сокращение претерпело оледенение районов четвертичного вулканизма и невулканических районов Камчатки на фоне повышения летних температур воздуха и сокращения количества выпадающих твёрдых осадков.
3. В районах активного вулканизма Камчатки оледенение в период с середины XX по начало XXI века не сократилось. Более того, в отдельных районах наблюдается его

увеличение. В частности, площадь оледенения Ключевской группы вулканов с 1950 по 2010–2015 гг. возросла на 4,3%.

4. Динамика ледников, расположенных на активных вулканах, не может использоваться в качестве индикатора климатических изменений. Колебания таких ледников определяются прежде всего вулканической деятельностью, которая по силе воздействия на режим и динамику ледников часто превосходит влияние изменений климатических условий существования ледников.
5. Влияние вулканизма на оледенение Камчатки в целом благоприятствует сохранению и развитию ледников на действующих вулканах, несмотря на ухудшение климатических условий их существования.

Личный вклад автора. Автор провёл поиск и анализ имеющихся материалов о ледниках Камчатки и их колебаниях с середины XX в. и проанализировал разнородные исторические материалы об оледенении Камчатки. По данным дистанционного зондирования Земли автором по единообразной методике определены современные границы ледников и рассчитаны их площади, а также изменения размеров ледников и положения фронтов ряда ледников по сравнению с историческими данными. Автор принимал непосредственное участие в полевых работах в ледниковых районах Камчатки в 2000–2015 гг., в ходе которых проводил обследования ледников и сбор гляциологических данных.

Практическая значимость работы. Получены данные о современном состоянии оледенения ледниковых районов Камчатки и его изменениях под влиянием меняющихся климатических условий и активного вулканизма. Результаты работы могут использоваться для оценки ледникового стока рек и прогнозирования опасных природных процессов, связанных с ледниками и вулкано-гляциальным взаимодействием.

Апробация работы. По теме диссертации были опубликованы: 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК; 1 статья в высокорейтинговом иностранном журнале, входящем в базы SCOPUS и Web of Science; 3 коллективных монографии; 14 тезисов конференций. Результаты исследований по теме диссертации были доложены на Пятой международной научной конференции «Вулканизм, биосфера и экологические проблемы» (Туапсе, 2009), на Международном гляциологическом симпозиуме (Казань, 2010), 7-м международном совещании по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (JKASP-2011) (Петропавловск-Камчатский, 2011), WCRP Open Science Conference «Climate Research in Service to Society» (США, штат Колорадо, Денвер, 2011), XV Гляциологическом симпозиуме «Прошлое, настоящее и будущее криосферы Земли» (Архангельск, 2012), Гляциологическом симпозиуме «Роль снега и льда в природе и жизни людей» (Новосибирск,

2014), международной конференции «MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN EARTH SCIENCES» (Петропавловск-Камчатский, 2014), «International Geographical Union Regional Conference «GEOGRAPHY, CULTURE AND SOCIETY FOR OUR FUTURE EARTH» (Москва, 2015), 26th IUGG (Чехия. Прага, 2015), международной конференции «Mountains of our Future Earth Perth» (Великобритания, Шотландия, Перт, 2015), XVI Гляциологическом симпозиуме "Прошлое, настоящее и будущее криосферы Земли" (Санкт-Петербург, 2016) и семинарах отдела гляциологии Института географии РАН. Результаты дешифрирования границ ледников северной части Срединного хребта (Камчатка) включены в базу данных GLIMS.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и списка таблиц. Список литературы включает 130 публикаций, в том числе 36 на иностранных языках. Общий объём работы составляет 168 страниц, включая 54 рисунка и 21 таблицу. Приведённые в работе карты-схемы, таблицы, графики и фотографии выполнены автором, если в подписи к ним не указано иное.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Физико-географическая характеристика Камчатки

В первой главе приведены сведения о географическом положении, макрорельефе и климате Камчатки, а также данные о распространении ледников, их морфологии и особенностях режима. Макрорельеф и климатические условия в целом способствовали возникновению и существованию современного оледенения на Камчатке. Разнообразные сочетания форм макрорельефа, климатических характеристик и наличия (или отсутствия) современной вулканической активности привели к большому разнообразию морфологических типов ледников и их режимных характеристик в разных районах Камчатки, а также к их неравномерному распределению по территории полуострова. Районы и узлы оледенения Камчатки, рассматриваемые в данной работе, отмечены на рис. 1.

Районы и узлы оледенения Камчатки, опираясь на данные работы [Виноградов, Глазырин, 1979], были разбиты на три группы, существенно различающиеся по степени разрушения вулканических построек и горных хребтов. А также преобладающим морфологическим типам ледников:

- 1) районы активного вулканизма: 3, 4, 15, 16 (вулканы Козельский, Авачинский и Корякский) и 17 на рис. 1
- 2) районы четвертичного вулканизма: 1 (южнее вулкана Подснежный), 2, 5–9, 11–13 и 18 на рис. 1

- 3) невулканические районы: 1 (севернее вулкана Подснежный), 10, 14 и 16 (Пиначевский хребет) на рис. 1

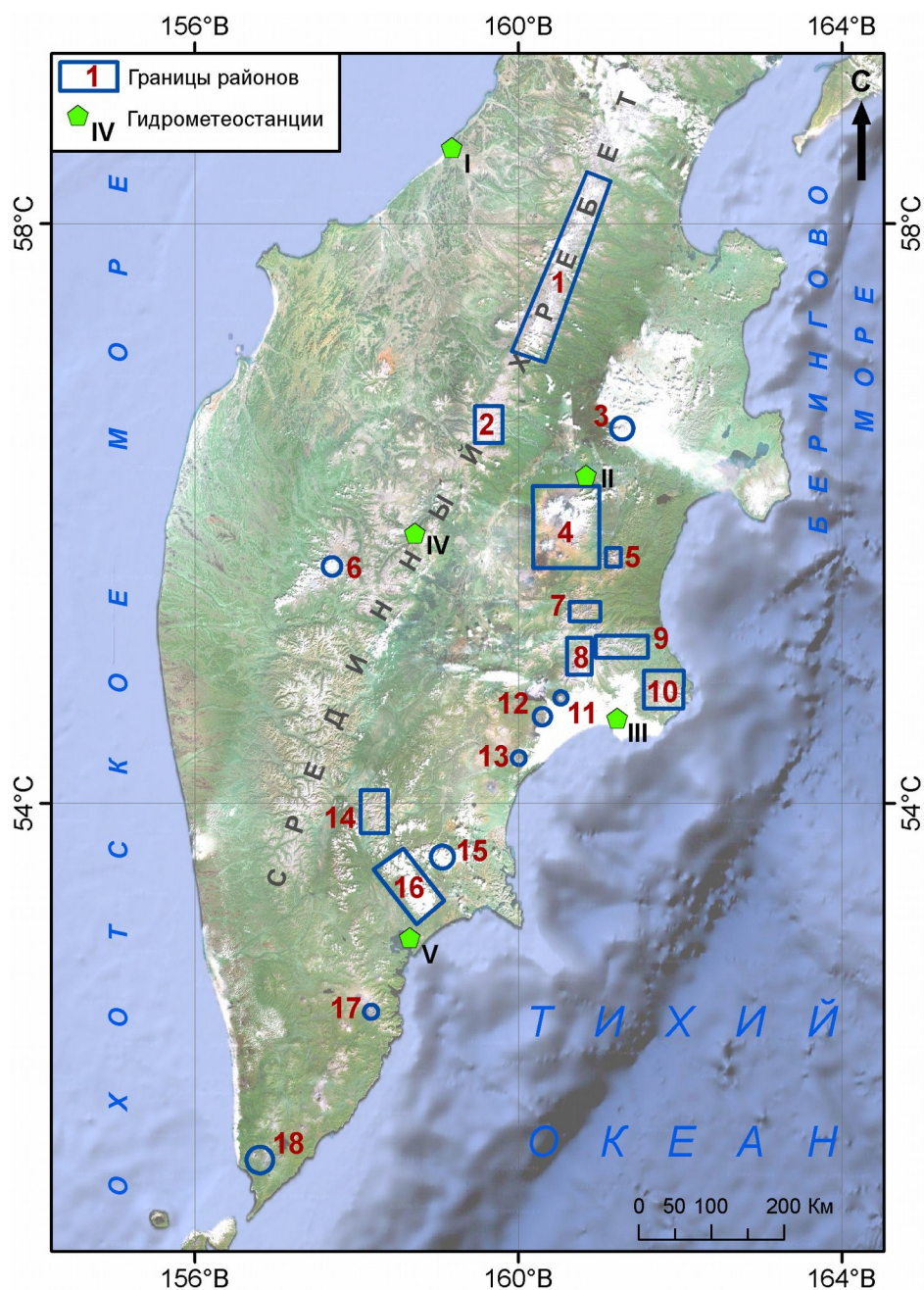


Рис. 1. Районы и узлы оледенения Камчатки: 1 – северная часть Срединного хребта; 2 – вулканический массив Алней-Чашаконджа; 3 – вулкан Шивелуч; 4 – Ключевская группа вулканов; 5 – вулкан Шиш; 6 – Ичинский вулкан; 7 – хребет Тумрок; 8 – хребет Гамчен, вулканы Высокий и Гамчен; 9 – Чажминский хребет; 10 – Кроноцкий полуостров; 11 – вулкан Кроноцкий; 12 – вулкана Крашенинникова; 13 – вулкан Большой Семячик; 14 – Валагинский и Ганальский хребты; 15 – вулкан Жупановский; 16 – Авачинская группа вулканов; 17 – вулкан Мутновский; 18 – вулканы Камбальный и Кошелева. Гидрометеостанции: I – Усть-Воямполка, II – Ключи, III – Кроноки, IV – Эссо, V – Петропавловск-Камчатский

Основной особенностью Камчатки, как района оледенения, является широкое распространение активных вулканов. Оледенение *районов активного вулканизма* приурочено, в основном, к крупным вулканическим постройкам (преимущественно к стратовулканам). Расположенные на вулканах ледники часто занимают такие специфические отрицательные формы вулканического рельефа, как кратеры, кальдеры, барранкосы, атрио, взрывные и обвальные цирки. Вследствие этого, в районах активного вулканизма распространены такие специфические морфологические типы ледников как кратерные, барранкосов, атрио и атрио-долинные, кальдерные и кальдерно-долинные, звездообразные и ледяной пояс, которые практически не встречаются в районах четвертичного вулканизма и полностью отсутствуют в невулканических районах Камчатки. Каровые ледники в районах современного активного вулканизма отсутствуют, поскольку формирование современного макрорельефа в них ещё не завершилось.

Влияние современного вулканизма на оледенение разноплановое. Оно может проявляться как в виде подвижек ледников, так и в виде сокращения или консервации их размеров. Данное влияние включает в себя ряд механизмов как способствующих сохранению и развитию ледников, так и оказывающих на них негативное отрицательное влияние. Наиболее значимыми по своему воздействию являются бронирующая роль чехла вулканогенного материала, существенно снижающего абляцию на ледниках районов активного вулканизма, и сейсмическое воздействие вулканов на ледники, оказывающее сильное влияние на их динамику.

На склонах многочисленных потухших вулканов *районов четвертичного вулканизма*, подвергнувшихся воздействию верхнечетвертичного оледенения, находится большое количество трогов и каров. Сами разрушенные вулканические постройки зачастую опознаются по периклинальному залеганию вулканических пород [Виноградов, Мелекесцев, 1966] и радиальной гидрографической сети (например, вулканы Шиш и Тумрок).

Для *невулканических районов* современного оледенения Камчатки характерно отсутствие вулканических форм рельефа, а также морфологических типов ледников, характерных для районов активного вулканизма. Крупнейшим районом оледенения из данной группы является Кроноцкий полуостров.

Климатические условия Камчатки определяются особенностями процессов циркуляции атмосферы над Охотским морем и северной частью Тихого океана. Климат существенно различается в пределах полуострова: морской в прибрежных районах полуострова; умеренно континентальный в Центрально-Камчатской межгорной депрессии; континентальный в пределах западных макросклонов Восточного хребта и вулканических плато, удалённых от его восточных макросклонов [Кондратюк, 1974]. Опепляющее влияние Тихого океана зимой

обуславливает на Камчатке относительно высокую среднюю годовую температуру воздуха, изменяющуюся от $-10 - -7$ °C на севере полуострова до $+2$ °C на его юго-восточном побережье [Глазырин и др., 1985].

Для анализа климатических изменений, произошедших на Камчатке за период исследований, были проанализированы данные наблюдений на гидрометеостанциях (далее ГМС) Ключи, Кроноки, Петропавловск-Камчатский, Усть-Воямполка и Эссо (расположение см. на рис. 1). Были изучены средние летние (с июня по август) температуры приземного воздуха за 1950–2015 гг. и суммы твёрдых осадков с октября по май (период аккумуляции на ледниках Камчатки) за 1966–2015 гг. Анализировались изменения данных характеристик, произошедшие в период современного потепления (с 1989 г.) по сравнению с базовым периодом 1951–1980 гг. Данные периоды были обоснованы в работах [Шмакин, Попова, 2006; Шмакин, 2010; Котляков и др., 2015а].

На ГМС «Усть-Воямполка» средние летние температуры воздуха в 1989–2006 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. выросли на $0,6^{\circ}\text{C}$. Суммы твёрдых осадков в 1989–2006 гг. по сравнению с 1966–1980 гг. в среднем сократились на 20,8%.

На ГМС «Ключи» средние летние температуры воздуха в 1989–2015 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. выросли на $1,2^{\circ}\text{C}$. Суммы твёрдых осадков в 1989–2015 гг. по сравнению с 1966–1980 гг. в среднем сократились на 2,3 %, а годовые суммы осадков – на 6,1 %.

На ГМС «Эссо» средние летние температуры воздуха в 1989–2014 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. выросли на $1,3^{\circ}\text{C}$. Суммы твёрдых осадков в 1989–2014 гг. по сравнению с 1966–1980 гг. в среднем сократились на 13,2 %, а годовые суммы осадков – на 10,9 %.

На ГМС «Петропавловск-Камчатский» средние летние температуры воздуха в 1989–2015 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. выросли на $0,9^{\circ}\text{C}$. Суммы твёрдых осадков в 1989–2015 гг. по сравнению с 1966–1980 гг. в среднем сократились на 14,3 %, а годовые суммы осадков – на 16,3 %.

Таким образом можно констатировать факт повышения летних температур воздуха, сокращения количества твёрдых осадков и годовых сумм осадков на Камчатке в период с середины 20 по начало 21 вв. Наибольшее повышение летних температур воздуха наблюдается в центральных районах полуострова (ГМС «Ключи» и «Эссо»), минимальное – на северо-западном побережье (ГМС «Усть-Воямполка»). Наибольшее сокращение количества выпадающих твёрдых осадков наблюдается в прибрежных районах Камчатки (ГМС «Усть-Воямполка» и «Петропавловск-Камчатский»). Из этого можно сделать вывод о том, что на Камчатке в период исследований произошло ухудшение климатических условий существования ледников.

Глава 2. История исследований ледников Камчатки и обзор литературы по теме работы

Во второй главе проанализирована история изучения ледников Камчатки и выделены его основные этапы, приведён обзор литературы по теме работы. Изучение современного оледенения Камчатки началось относительно недавно (целенаправленно с 1958 г.).

Изученность ледников, расположенных в различных районах Камчатки, и регулярность наблюдений на них неодинакова. Исторически сложилось так, что наиболее изученными являются ледники Авачинской и Ключевской групп вулканов, находящиеся под непосредственным влиянием активного вулканизма. Гораздо менее изучены ледники Кроноцкого полуострова, на которые современные вулканические процессы оказывают минимальное влияние (редкие пеплопады). Наименее изучены, по причине труднодоступности, ледники Срединного хребта и ряда районов Юго-Восточной Камчатки.

Накопленные данные об оледенении Камчатки свидетельствуют о больших различиях между разными ледниковыми районами полуострова. Данные различия проявляются в количестве ледников и их площади, преобладании в разных районах различных морфологических типов ледников, режиме и динамике ледников. На Камчатке присутствуют как классические тёплые ледники Кроноцкого полуострова, так и более континентальные ледники, в областях которых господствуют холодная фирновая и фирново-ледяная зоны льдообразования (Ключевская группа вулканов, Срединный хребет). Из-за больших различий в сочетании факторов оледенения и, вследствие этого, режима ледников, оледенение разных районов Камчатки по-разному реагирует на современные климатические изменения.

Глава 3. Данные, методы и погрешности измерений

В третьей главе рассматриваются современные методы получения спутниковых данных о состоянии горных ледников и их применимость, погрешности определения положения границ ледников с использованием данных космической съёмки. Приведены методы и данные дистанционного зондирования Земли (далее ДЗЗ), используемые в данной работе.

Основная часть данных о современных границах ледников Камчатки в настоящей работе получена с помощью анализа и интерпретации данных ДЗЗ. В работе использовались современные космические снимки, сделанные в видимой зоне спектра (панхроматические и мультиспектральные) спутниковыми системами ASTER, Landsat (сенсор OLI_TIRS), GeoEye-1, WorldView-2 и IKONOS. Пространственное разрешение спутниковых снимков составляло от 2 м (в мультиспектральном режиме) до 15 м. Подбор спутниковых снимков для обработки осуществлялся, по возможности, на вторую половину августа – первую половину сентября (конец периода абляции).

Использование данных ДЗЗ позволило оценить современное состояние оледенения труднодоступных районов Камчатки, для которых отсутствуют иные типы гляциологических данных. Современные космические снимки, использованные в данной работе, имели пространственную привязку в определённой проекции (на эллипсоиде WGS-84) и были ортотрансформированы.

Помимо современных космических снимков в работе использовались различные данные ДЗЗ, полученные до 2000 г. и не имеющие пространственной привязки (за исключением снимка Landsat (сенсор ETM+) 2000 г.). К ним относятся: спутниковый снимок КН-9 от 28.06.1975 с пространственным разрешением 6–9 м (данные NASA, опубликованные на портале earthexplorer.usgs.gov); спутниковый снимок Landsat (сенсор ETM+) от 22.09.2000 с пространственным разрешением 15 м (панхроматический канал); аэрофотоснимки (АФС), охватывающие территории разных ледников (часто фрагментарно), 1949–1984 гг. с пространственным разрешением от 2 до 10 м. Ортотрансформирование исторических спутниковых и аэрофото- снимков осуществлялось с использованием современных спутниковых снимков GeoEye-1, WorldView-2 и ASTER (для территорий, не покрытых снимками GeoEye-1 и WorldView-2). Все снимки для дальнейшей обработки трансформировались в проекцию UTM (зона 57N).

Работа с пространственными данными, включающая их привязку, трансформацию и геометрические измерения, осуществлялась в программных пакетах ArcGIS и QGIS. Для определения высотных параметров ледников использовалась ЦМР ASTER GDEM2, имеющая, согласно данным разработчиков [*Tachikawa et. al., 2011*], точность по высоте 17 м с уровнем доверия 95%.

Дешифрирование границ ледников на материалах ДЗЗ осуществлялось ручным методом по методике международного проекта GLIMS, представленной в руководстве [*Raup, Khalsa, 2010*]. Автоматизированные методы дешифрирования не применялись по двум причинам: 1) на ледниках большинства районов (особенно вулканических) Камчатки развита поверхностная морена, что приводит к резкому снижению качества результатов, получаемых с применением данных методов (см. рис. 2); 2) широкое распространение снежников-перелетков и многолетних снежников в горных районах Камчатки, вследствие климатических особенностей полуострова, что также препятствует применению современных методов автоматического дешифрирования.

Несмотря на стремительное развитие дистанционных методов получения данных о поверхности Земли и находящихся на ней объектах, а также увеличение объёма получаемых данных и их доступности, сохраняется важная роль наземных наблюдений в изучении ледников. Данные полевых наблюдений использовались для уточнения и дополнения результатов

обработки данных ДЗЗ, а также в процессе дешифрирования границ ледников на современных спутниковых снимках как вспомогательный материал для улучшения качества результатов.

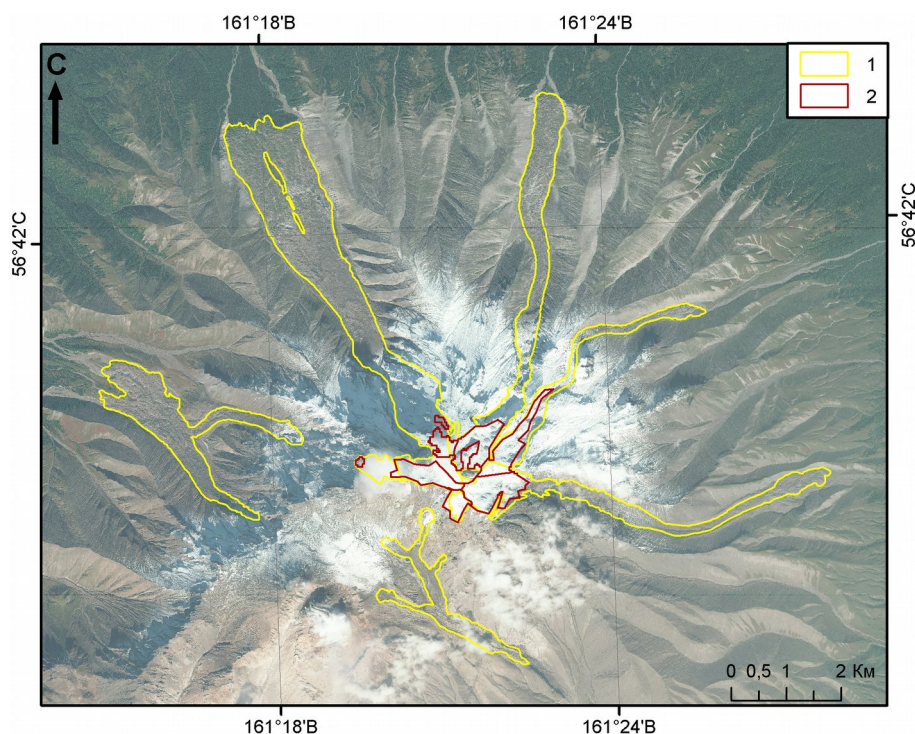


Рис. 2. Границы ледников на вулкане Шивелуч: 1 – ручное дешифрирование спутниковых снимков WorldView-2 от 04.09.2013; 2 – автоматизированное дешифрирование (данные Randolph Glacier Inventory 5.0 на 03.08.2011)

Глава 4. Изменения площади и колебания фронтов ледников Камчатки во второй половине XX – начале XXI вв.

В четвёртой главе приведены результаты исследований изменения площадей оледенения ледниковых районов Камчатки с середины XX по начало XXI в., изменения площадей отдельных ледников и положения их фронтов за различные промежуточные периоды. В результате проведённой работы на современных спутниковых снимках, охватывающих ледниковые районы Камчатки, было идентифицировано 643 ледника общей площадью $769,47 \pm 30,27$ км². Из них: 295 соответствуют зарегистрированным в Каталоге ледникам, сохранившим целостность; 85 являются сегментами 34 распавшихся ледников, зарегистрированных в Каталоге; 263 ледника не представлены в Каталоге. 74 ледника, отмеченные в Каталоге, не были идентифицированы на современных спутниковых снимках. 12 из них в период с середины XX по начало XXI в., вероятно, трансформировались в каменные глетчеры (в районе хребтов Валагинский и Ганальский). Ледник Ключевской (№ 170) как отдельное целостное образование не рассматривался. Современное распределение ледников по гляциологическим районам Камчатки отражено в таблице 1.

Таблица 1. Современное распределение ледников по гляциологическим районам Камчатки

Район	Кол-во ледников	Площадь ледников, км ²	Доля от площади оледенения Камчатки, %	Годы, на которые приведены данные
<i>Срединный хребет</i>				
северная часть Срединного хребта	388	335,31±9,72	43,6	2002
массив Алней-Чашаконджа	45	50,31±3,44	6,5	2010
Ичинский вулкан	20	29,03±1,41	3,8	2011–2014
<i>Итого по Срединному хребту</i>	<i>453</i>	<i>414,65±14,57</i>	<i>53,9</i>	<i>2002–2014</i>
<i>Кроноцкий полуостров</i>	50	68,1±4,52	8,9	2013
<i>Ключевская группа вулканов</i>	40	214,33±6,56	27,9	2010–2015
<i>вулкан Шивелуч</i>	8	16,62±0,84	2,2	2013
<i>Юго-Восточная Камчатка</i>				
Авачинская группа вулканов	27	22,43±1,42	2,9	2012–2013
вулкан Мутновский	13	3,55±0,14	0,5	2012
прочие районы Юго-Восточной Камчатки	52	29,79±2,22	3,9	2007–2015
<i>Итого по Юго-Восточной Камчатке</i>	<i>92</i>	<i>55,77±3,78</i>	<i>7,3</i>	<i>2007–2015</i>
<i>Всего</i>	643	769,47±30,27	100	2002–2015

Изменения оледенения Камчатки, произошедшие с середины XX в., существенно различаются в разных районах полуострова. В большинстве районов Камчатки произошло сокращение общей площади ледников по сравнению с данными Каталога (см. таблицу 2, рис. 3). Однако есть районы, в которых изменения площади оледенения близко к нулю (Ичинский вулкан и ряд районов Юго-Восточной Камчатки). Обособленное место занимает Ключевская группа вулканов, в пределах которой площадь оледенения возросла. Такая неоднородность динамики оледенения различных районов Камчатки обусловлена разнообразием сочетаний форм макрорельефа, климатических характеристик и наличия (или отсутствия) современной вулканической активности.

Наибольшее сокращение претерпело оледенение Кроноцкого полуострова – 27,6 (24,6 км²) за 1957–2013 гг. Тёплые ледники (в областях питания господствует тёплая фирновая зона льдообразования) данного района являются чувствительным индикатором ухудшения климатических условий их существования, выражающегося, прежде всего в росте летних температур воздуха.

Таблица 2. Изменение площади оледенения районов оледенения Камчатки с середины XX по начало XXI века (для ледников, идентифицированных на современных спутниковых снимках и зарегистрированных в Каталоге)

Район	Площадь ледников, км ²		Изменение площади, км ² /%	Временной интервал, гг.
	по Каталогу	современная		
<i>Срединный хребет</i>				
северная часть Срединного хребта	348,3	290,65±8,43	−57,65/−16,6	1950–2002
массив Алней-Чашаконджа	60,5	48,7±3,2	−11,8/−19,5	1950–2010
Ичинский вулкан	29,1	28,91±1,35	−0,19/−0,7	1950 – 2011–2014
<i>Итого по Срединному хребту</i>	437,9	368,26±12,98	−69,64/−15,9	1950 – 2002–2014
<i>Кроноцкий полуостров</i>	89,1	64,5±4,01	−24,6/−27,6	1957–2013
<i>Ключевская группа вулканов</i>	200,1*	208,8±6,44*	8,7/4,3*	1950 – 2010–2015
<i>вулкан Шивелуч</i>	30,2**	16,22±0,8	−**	1950–2013
<i>Юго-Восточная Камчатка</i>				
Авачинская группа вулканов	20,0*	21,30±1,30	1,3/6,5*	1950 – 2012–2013
вулкан Мутновский	2,0	2,05±0,05	0,05/2,5	1950–2012
прочие районы Юго-Восточной Камчатки	28,6	29,98±2,12	0,30/1,3	1950 – 2007–2015
<i>Итого по Юго-Восточной Камчатке</i>	50,6	53,33±3,47	2,73/5,4	1950 – 2007–2015
<i>Всего</i>	777,7***	694,89±26,9***	−82,81/−10,6***	1950 – 2002–2015

* Была произведена переоценка площадей ряда ледников, отмеченных в Каталоге, и дополнена выборка

** Площади по Каталогу для ряда ледников вулкана Шивелуч существенно завышены. Делать выводы об изменении площади оледенения вулкана Шивелуч на основании прямого сравнения с данными Каталога некорректно

*** Не включая данные по вулкану Шивелуч

Сокращение ледников Срединного хребта оказалось существенно меньше – от практически отсутствующих изменений на Ичинском вулкане с 1950 по 2011–2014 гг. (сокращение на 0,7 % или 0,19 км²) до 19,5% (11,8 км²) на вулканическом массиве Алней-Чашаконджа за 1950–2010 гг. Оледенение северной части Срединного хребта – крупнейшего ледникового района Камчатки – за 1950–2002 гг. сократилось на 16,6% (57,65 км²). При этом во всех районах оледенения Срединного хребта за период исследований выявлен рост летних температур воздуха и сокращение количества твёрдых осадков. Таким образом, выявленные изменения оледенения северной части Срединного хребта и вулканического массива Алней-Чашаконджа являются следствием и индикатором ухудшения климатических условий

существования. Площадь оледенения Ичинского вулкана практически не изменилась благодаря мощному моренному покрову, бронирующему языки ледников.

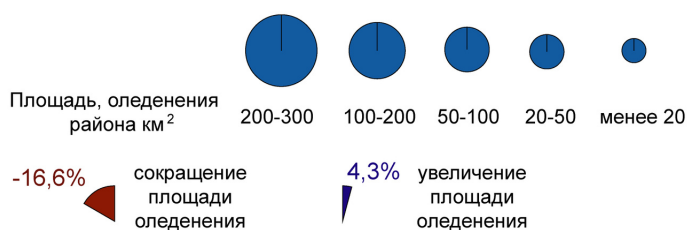
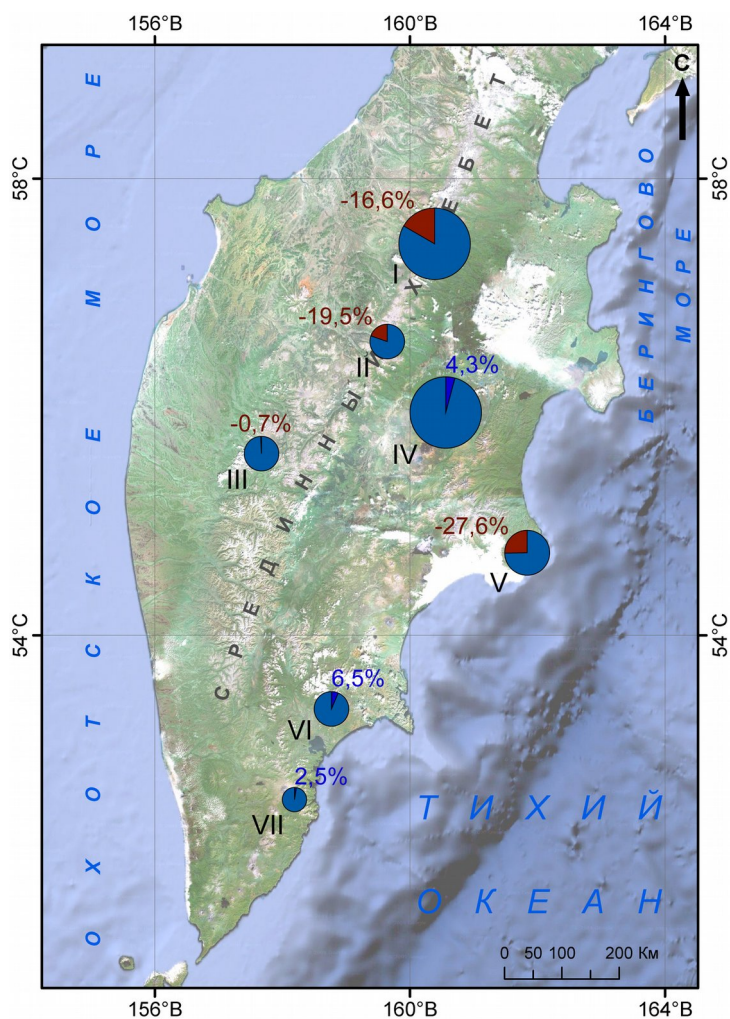


Рис. 3. Изменение площади оледенения ряда районов оледенения Камчатки с середины XX по начало XXI века.

Районы и узлы оледенения Камчатки: I – северная часть Срединного хребта; II – вулканический массив Алней-Чашаконджа; III – Ичинский вулкан; IV – Ключевская группа вулканов; V – Кроноцкий полуостров; VI – Авачинская группа вулканов; VII – вулкан Мутновский.

В пределах Ключевской группы вулканов, наоборот, наблюдается небольшой рост площади оледенения – 4,3% (8,7 км²) с 1950 по 2010–2015 гг. (см. табл. 2 и рис. 3), несмотря на ухудшение климатических условий его существования. Особенно динамично оледенение Ключевского вулкана, на котором под воздействием активного вулканизма конфигурация границ ледников существенно изменяется не только в их языковых частях, но и в областях аккумуляции. На склонах Ключевского вулкана наблюдается постепенное отмирание ряда языков «блуждающих ледников». Параллельно этому в пределах «ледяного пояса» формируются новые потоки активного льда. Все известные подвижки ледников этого вулкана

связаны с его извержениями.

С 1945 г. практически непрерывно наступает ледник Эрмана – крупнейший ледник Камчатки. С 1949 по 2015 г. площадь его фронтальной части ледника увеличилась на $4,96 \pm 0,39$ км², а его фронт продвинулся на 3675 ± 15 м (до высоты 1035 м) по долине р. Сухая и, на 3480 ± 20 м (до высоты 950 ± 10 м), по долине р. Крутенькая (рис. 4).

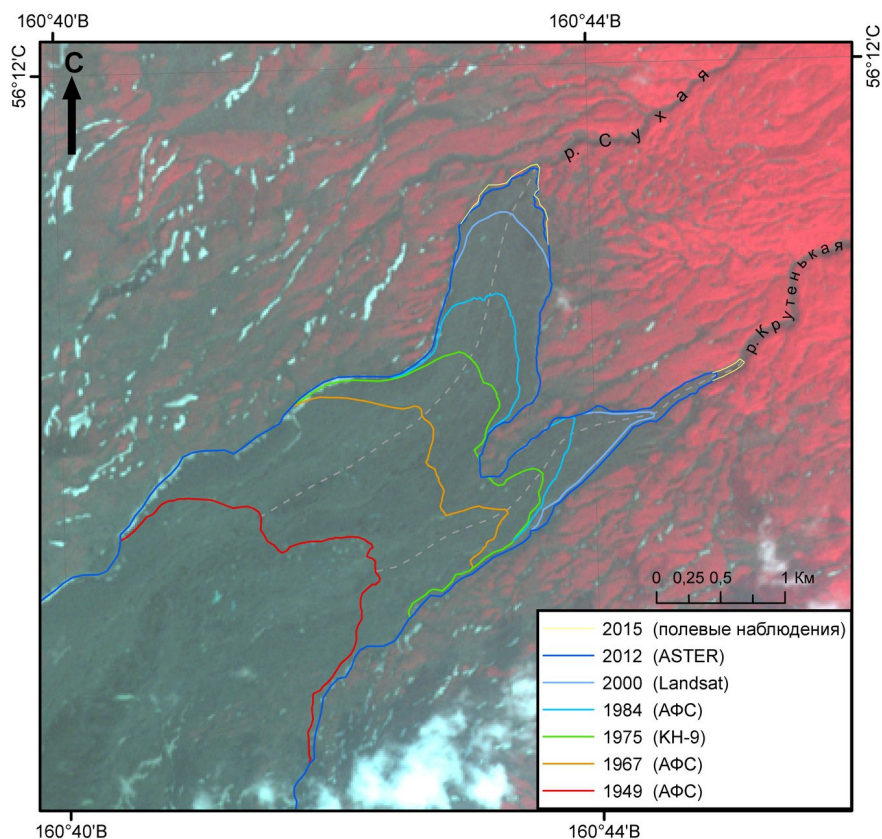


Рис. 4. Продвижение фронта ледника Эрмана в 1949–2015 гг. В подложке спутниковый снимок ASTER от 19.07.2012

Динамика фронтов ледников вулкана Шивелуч (всего идентифицировано 8) имеет явное сходство с динамикой фронтов ледников Ключевской группы вулканов. Фронт ледника Тюшева в 1975–2013 гг. наступал. Фронты ледников № 95–99 в период 1975–2013 гг. были квазистационарны.

Изменения оледенения различных районов Юго-Восточной Камчатки (районы 5, 7–9, 11–18 на рис. 1) крайне неоднородно, что обусловлено большим разнообразием сочетаний форм макрорельефа, климатических характеристик и наличия (или отсутствия) современной вулканической активности. В целом наблюдается его рост (на 4,7% или 2,33 км²), обусловленный увеличением площади расположенных на активных вулканах ледников. В частности, с 1971 года почти непрерывно (период стабилизации и кратковременного отступления в 1978–1981 гг.) наступает ледник Козельский (рис. 5), спускающийся с седловины между вулканами Козельский и Авачинский на юг. Площадь оледенения районов четвертичного вулканизма и невулканических районов Юго-Восточной Камчатки сократилась.

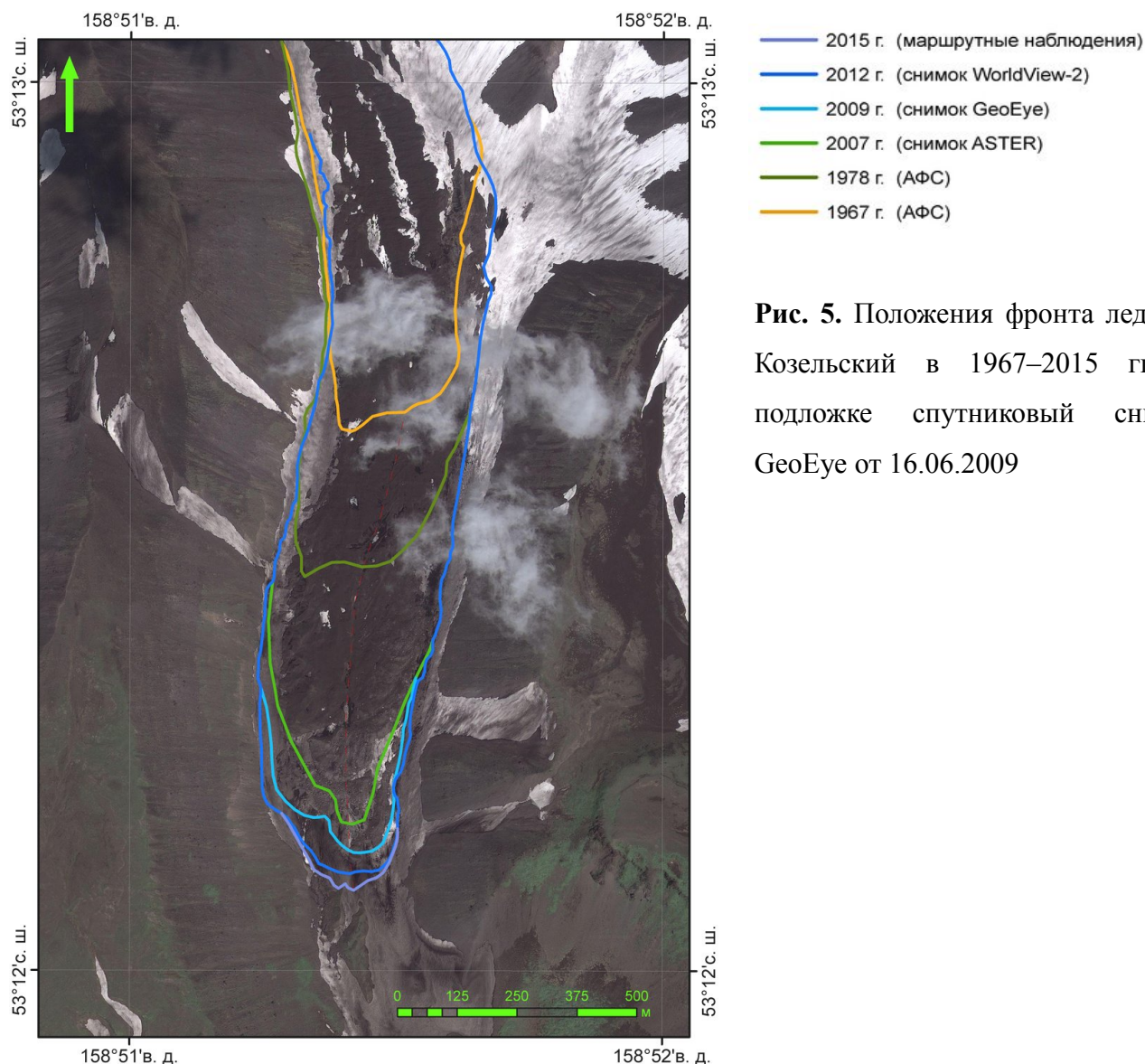


Рис. 5. Положения фронта ледника Козельский в 1967–2015 гг. В подложке спутниковый снимок GeoEye от 16.06.2009

В целом по Камчатке сокращение оледенения с середины XX по начало XXI века по сравнению с данными Каталога составило $82,8 \pm 26,9 \text{ км}^2$ или 10,6%.

Было проведено сравнение полученных в данной работе результатов с информацией из глобальной базы данных современных границ (и иных параметров) ледников «Randolph Glacier Inventory» (RGI) версии 5.0. В RGI 5.0 на территорию Камчатки присутствует 984 объекта общей площадью $770,26 \text{ км}^2$ ($\pm 5\%$ или $\pm 38,51 \text{ км}^2$) [Arendt *et. al.*, 2015], идентифицированные в результате автоматизированного дешифрирования спутниковых снимков. Контура ледников, присутствующих в базе данных, приведены по состоянию на 2000–2013 гг. Количество объектов, идентифицированных как ледники, в RGI 5.0 на 341 (53%) превышает количество ледников, идентифицированных на современных спутниковых снимках в настоящей работе. Проверка данных RGI 5.0 на ряде тестовых участков показала, что во многих случаях за ледники были приняты крупные многолетние снежники и снежники-перелетки. Это является

издержками алгоритма автоматизированного дешифрирования, в который заложено разграничение типов объектов на «ледники» и «снежники» в зависимости от их геометрических размеров (площади).

В то же время, в базе данных RGI 5.0 отсутствует ряд ледников вулканических районов Камчатки с развитой поверхностной мореной. Границы многих крупных ледников с развитой поверхностной мореной также существенно различаются в настоящей работе и RGI 5.0 (см. рис. 2). Особенно актуальна данная проблема для районов активного вулканизма, таких как Ключевская группа вулканов. Суммарная площадь ледников Ключевской группы вулканов в RGI 5.0 на 2011 г. составила $153,32 \pm 7,67$ км². Аналогичная площадь в настоящей работе по состоянию на 2010–2015 гг. составила $208,8 \pm 6,44$ км², то есть на 36,2% больше.

Для оледенения районов активного вулканизма и остальных ледниковых районов Камчатки в период с середины XX по начало XXI века характерна принципиально различная динамика (см. рис. 3). Площадь оледенения Ключевской группы вулканов возросла на 4,3% (8,7 км²) вопреки ухудшению климатических условий своего существования. Площадь оледенения Авачинской группы вулканов возросла на 6,5% (1,3 км²), что также не соответствует изменениям основных климатических факторов. В данных районах наблюдаются ледники, непрерывно наступающие в течении десятков лет (Эрмана, Богдановича, Козельский), причиной чего является вулканический фактор – прежде всего, бронирующая роль поверхностной морены и сейсмическое воздействие вулканов на ледники. Благодаря бронирующей роли поверхностной морены, сложенной вулканогенным материалом, фронты большинства ледников, не находящихся в стадии наступания, находятся в квазистационарном состоянии.

Площадь оледенения остальных районов Камчатки в указанный период сокращалась вследствие ухудшения климатических условий существования (рост летних температур воздуха и сокращение количества твёрдых осадков). Наибольшее сокращение (24,6 км² или 27,6% за 1957–2013 гг.) претерпело оледенение Кроноцкого полуострова, представленное наиболее чувствительными к климатическим изменениям ледниками тёплого типа. Гораздо меньшее сокращение претерпело оледенение северной части Срединного хребта (57,65 км² или 16,6% за 1950–2002 гг.) и вулканического массива Алней-Чашаконджа (11,8 км² или 19,5% за 1950–2010 гг.).

Наряду с Камчаткой, на Земле есть ряд районов, в которых присутствуют активные вулканы с расположенными на них горными ледниками: о. Исландия, о. Ян-Майен, Аляска, Новая Зеландия, горные районы Колумбии и Эквадора и др. Данные районы существенно различаются климатическими условиями, преобладающими типами вулканических построек и их извержений. Существенные различия в частоте извержений вулканов, объёмах извергаемого

материала и его типе (лавы, шлаки, пеплы) привели к значительным различиям в воздействии активного вулканизма на режим ледников этих районов. По совокупности особенностей режима и динамики ледников, оледенение районов активного вулканизма Камчатки уникально.

По результатам сравнения полученных в настоящей работе результатов с данными о изменении оледенения других горных районов умеренных широт Евразии можно сделать вывод о том, что сокращение оледенения районов четвертичного вулканизма и невулканических районов Камчатки сопоставимо с сокращением оледенения Кавказа и Алтая. Динамику оледенения районов активного вулканизма нельзя сравнивать напрямую с динамикой оледенения других районов оледенения Камчатки, так как влияние современного вулканизма на неё сильнее влияния климатических изменений. В отличие от районов четвертичного вулканизма и невулканических районов Камчатки, оледенение районов активного вулканизма не имеет тенденции к сокращению площади. Вследствие этого, общая величина наблюдаемого сокращения оледенения Камчатки ($82,8 \pm 26,9$ км² или 10,6% за 1950–2002/2015 гг.) существенно меньше, чем в других горных районах умеренных широт Евразии.

Заключение

В результате исследования современного состояния оледенения ледниковых районов Камчатки с применением комплекса дистанционных методов в сочетании с данными полевых наблюдений и сравнения его результатов с историческими данными были определены изменения оледенения района исследований в период с середины XX по начало XXI века. Были выявлены связи изменений, произошедших с оледенением различных районов Камчатки, с климатическими изменениями, произошедшими за период исследований. Проведённая работа позволила прийти к следующим основным результатам и выводам:

1. Зафиксировано положение границ ледников в районах оледенения Камчатки по состоянию на 2002–2015 гг. Определена современная площадь каждого из 643 идентифицированных ледников Камчатки и площадь оледенения района в целом ($769,47 \pm 30,27$ км²).
2. Выявлено сокращение площади оледенения Камчатки в целом на 10,6% с середины XX по начало XXI века. Сокращение претерпело оледенение районов четвертичного вулканизма и невулканических районов Камчатки на фоне повышения летних температур воздуха и сокращения количества выпадающих твёрдых осадков.
3. В районах активного вулканизма Камчатки оледенение в период с середины XX по начало XXI века не сократилось. В отдельных районах наблюдается его медленный рост.

В частности, площадь оледенения Ключевской группы вулканов с 1950 по 2010–2015 гг. возросла на 4,3%.

4. Взаимодействие современного вулканизма и оледенения в районах активного вулканизма Камчатки в целом благоприятствует сохранению и развитию ледников, несмотря на ухудшение климатических условий их существования.
5. Динамика ледников, расположенных на активных вулканах, не может использоваться в качестве индикатора климатических изменений. Колебания таких ледников определяются прежде всего вулканической деятельностью, которая по силе воздействия на режим и динамику ледников часто превосходит влияние изменений климатических условий существования ледников.
6. В районах активного вулканизма Камчатки благодаря влиянию вулканогенного материала на поверхности и внутри ледников, фронты большинства ледников, не находящихся в стадии наступания, находятся в квазистационарном состоянии.
7. Сокращение оледенения районов четвертичного вулканизма и невулканических районов Камчатки в период с середины XX по начало XXI века сопоставимо с сокращением оледенения Кавказа и Алтая.

Полученные данные об изменении оледенения Камчатки существенно дополняют общую картину изменений оледенения горных систем умеренных широт Евразии. Сокращение ледников, расположенных вне районов активного вулканизма, хорошо согласуются с современными климатическими изменениями на Камчатке, в частности, с существенным повышением летних температур воздуха. Полученные результаты и разработанные методические подходы к исследованиям ледников районов активного вулканизма с использованием данных ДЗЗ являются основой для составления современного каталога ледников Камчатки. Результаты работы могут использоваться для оценки риска возникновения опасных природных процессов, связанных с ледниками и вулкано-гляциальным взаимодействием на Камчатке. Динамика ледников, расположенных в районах активного вулканизма, представляет собой перспективный для дальнейшего изучения феномен, сильно выделяющийся на общем фоне.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Т.Е. Хромовой, Я.Д. Муравьеву, оказавшему неоценимую помощь в сборе материала и консультировавшему автора, Г.А. Носенко, консультировавшему автора, и научному коллективу отдела гляциологии Института географии РАН за ценные советы, плодотворные дискуссии и замечания. Автор

благодарен сотрудникам ИВиС ДВО РАН Т.М. Маневич, оказавшей помощь в подборе материалов и полевых работах, и С.Б. Самойленко за помощь в полевых работах.

Список опубликованных работ по теме диссертации

– Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я. Новые данные о современных изменениях ледников горных районов России // Доклады Академии наук. 2015. Т. 464. № 6. С. 727–734. DOI: 10.7868/S0869565215300192
2. Муравьев А.Я. Изменение размеров ледников Кроноцкого полуострова и массива Алней-Чашаконджа на Камчатке во второй половине XX – начале XXI в. // Лёд и Снег. 2014. № 2(126). С. 22–28. DOI: 10.15356/2076-6734-2014-2-22-28
3. Муравьев А.Я. Открытие и исследования ледников Камчатки // Лёд и Снег. 2015. № 2(130). С. 123–132. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-2-123-132
4. Муравьев А.Я., Муравьев Я.Д. Колебания ледников Ключевской группы вулканов во второй половине XX – начале XXI века // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 480–492. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4
5. Муравьев А.Я., Носенко Г.А. Изменения оледенения северной части Срединного хребта на Камчатке во второй половине XX в. // Лёд и Снег. 2013. № 2(122). С. 5–11. DOI: 10.15356/2076-6734-2013-2-5-11
6. Муравьев Я.Д., Цветков Д.Г., Муравьев А.Я., Осипова Г.Б. Динамика пульсирующего ледника Бильченков в Ключевской группе вулканов // Лёд и Снег. 2012. № 2(118). С. 31–39. DOI: 10.15356/2076-6734-2012-2-

– Публикации в иных рецензируемых журналах и коллективные монографии:

7. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. М.: Тов-во научных изданий КМК. 2015. 288 с.
8. Оледенение Северной и центральной Евразии в современную эпоху / Под ред. В.М. Котлякова. Ананичева М.Д., Глазовский А.Ф., Десинов Л.В., Казанский А.Б., Китаев Л.М., Коновалов В.Г., Кононов Ю.М., Котляков В.М., Кренке А.Н., Кутузов С.С., Лебедева И.М., Мачерет Ю.Я., Михаленко В.Н., Муравьев А.Я., Носенко Г.А., Осипова Г.Б., Попова В.В., Рототаева О.В., Тарасова Л.Н., Турков Д.В., Хмелевской И.Ф., Цветков Д.Г. Москва. Наука. 2006. С. 204–210.
9. Khromova T., Nosenko G., Kutuzov S., Muraviev A., Chernova L. Glacier area changes in Northern Eurasia // Environmental Research Letters. Vol. 9. №1. 2014. 11 p. DOI: 10.1088/1748-

9326/9/1/015003

10. Mountain Ice and Water / Edited by Gregory B. Greenwood and J.F. Shroder, Jr. / Barker N., Chernova L., Choudhury G., Clark V.R., Claustres A., Engelbrecht F.A., Ferguson J.W.H., Fischer A., Hansson S.V., Hartl L., Helfricht K., Hicks M.T., Hreinsson V., Juliusson A.D., Khromova T., Le Roux G., Muraviev A., Nikitin S., Nosenko G., Ogilvie A.E.J., Sarmiento F.O., Seidler R., Seiser B., Sharma G., Sigurðardottir R., Stocker-Waldhuber M., Strachan S., Taylor S.J., Telwala Y., Van Rensburg S., Wiesenegger H., Zverkova N. Elsevier. 2016. 388 p. ISBN: 978-0-444-63787-1. ISSN: 0928-2025

– Прочие публикации:

11. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Чернова Л.П., Никитин С.А., Муравьев А.Я., Зверкова Н.М. Ледники горных районов России в XX и начале XXI века // Тезисы докладов на XVI Гляциологическом симпозиуме «Прошлое, настоящее и будущее криосферы Земли», Санкт-Петербург, 23–29 мая 2016 г. С. 66.
12. Котляков В.М., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М. Изменения горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет // Тезисы докладов на XVI Гляциологическом симпозиуме «Прошлое, настоящее и будущее криосферы Земли», Санкт-Петербург, 23–29 мая 2016 г. С. 67.
13. Муравьев А.Я. Изменение размеров ледников Кроноцкого полуострова и массива Алней-Чашаконджа на Камчатке во второй половине XX - начале XXI вв. // Тезисы докладов Гляциологического симпозиума, Новосибирск, 15–17 января 2014 г. С. 48.
14. Муравьев А.Я. Оценка изменения оледенения северной части Срединного хребта, массива Алней-Чашаконджа и Кроноцкого полуострова на Камчатке во второй половине XX - начале XXI вв. по материалам космических съёмок и историческим данным // Тезисы докладов международной конференции «MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN EARTH SCIENCES», Петропавловск-Камчатский, 8–14 сентября 2014 г. С. 93.
15. Муравьев А.Я., Муравьев Я.Д. Колебания ледников Ключевской группы вулканов во второй половине XX – начале XXI века // Тезисы докладов XVI Гляциологического симпозиума, Санкт-Петербург, 24–29 мая 2016 г. С. 76.
16. Муравьев А.Я., Носенко Г.А. Оценка изменения оледенения северной части Срединного хребта (Камчатка) во второй половине XX века по материалам космических съёмок и историческим данным // Тезисы докладов XV Гляциологического симпозиума, Архангельск, 3–8 июня 2012 г. С. 97.
17. Муравьев Я.Д., Муравьев А.Я., Осипова Г.Б. Ледниковые подвижки в районах активного вулканизма (Камчатка) // Тезисы докладов Международного гляциологического симпозиума

«Лёд и снег в климатической системе». КГУ, Казань, 31 мая – 4 июня 2010 г.

18. Муравьев Я.Д., Муравьев А.Я., Осипова Г.Б. Ледниковые подвижки на действующих вулканах, как фактор дополнительной опасности для окружающих территорий (на примере ледника Бильченков, Камчатка) // Сборник материалов Пятой международной научной конференции «Вулканизм, биосфера и экологические проблемы». Туапсе, 4–8 октября 2009 г. С. 154.
19. Муравьев Я.Д., Муравьев А.Я., Осипова Г.Б. Особенности динамики ледяных массивов на действующих вулканах, Камчатка // Тезисы докладов 7-го международного совещания по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (JKASP-2011). Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Камчатка, 25–30 августа 2011 г.
20. Хромова Т.Е., Медведев А.А., Муравьев А.Я., Зверкова Н.М. Снег и лёд на Земле. Электронный атлас. <http://www.webgeo.ru/index.php?r=27&page=1&id=5768> DOI: 10.15356/DASAI0E2015
21. Khromova T., Nosenko G., Muraviev A., Kutuzov S., Lavrentiev I. Present state and recent changes of glaciers on the territory of the former Soviet Union // Proceedings of WCRP Open Science Conference. Climate Research in Service to Society. Denver CO, USA, 24–28 october 2011 г.
22. Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A. Mountain glaciers changes on the territory of Russia // International Geographical Union Regional Conference «GEOGRAPHY, CULTURE AND SOCIETY FOR OUR FUTURE EARTH», 17–21 August 2015, Moscow, Russia, IGU 2015 Book of Abstracts.
23. Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A. Mountain glaciers on the territory of Russia: Results on inventorying and an assessment of glacier changes // Abstract for the IACS Symposium. C03 Glacier Monitoring from In-Situ and Remotely Sensed Observations. The 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. June 22 – July 2, 2015. Prague.
24. Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V. Last decades of mountain glaciers changes on the territory of Russia // Abstract for the International conference: «Mountains of our Future Earth Perth», Scotland, UK, on 4–8 October 2015.